

ノート

マルチベネフィットの視点でとらえた土壁材の 再生製品開発に向けた基礎研究

近藤笑加, 今村一貴*, 柘植 亮, 森 理佳, 矢野真弓, 石田健太**, 山川雅弘

Basic research for developing recycled soil wall materials

Emika KONDO, Kazutaka IMAMURA*, Ryo TSUGE, Rika MORI,
Mayumi YANO, Kenta ISHIDA**, Masahiro YAMAKAWA

土壁材の再資源化を最終的な目標として、解体工事現場で排出された壁土や屋根土に含まれる藁などの有機物を除去するための効果的な処理方法を実験的に検討した。

乾式選別処理と湿式選別処理、焼成処理の3方法を5種類の土壁材にそれぞれ施し、土壁材中の有機物量と、溶出量試験における溶出水の有機物濃度等を測定してその変化量を調査するとともに、土壌との比較を行った。

乾式選別処理では、土壁材中の有機物除去には目開き1 mm または0.25 mm の篩による選別が効果的であったが、溶出水中の有機物濃度は処理をしても大きな変化はみられず、目開きが最も小さい0.25 mm 篩では有機物濃度が増加する結果であった。湿式選別処理では有機物除去効果が低く、処理に伴って排出された洗浄水の有機物濃度も比較的高値で検出された。焼成処理は土壁材中の有機物量が有機物除去に最も効果的な処理方法であったが、処理後の土壁材の溶出量試験においてCr(VI)やAs等の有害物質が土壌の汚染に係る環境基準値を超過した。乾式選別処理、湿式選別処理後の土壁材を土壌と比較したところ、土壁材に含有する有機物量は処理前であっても土壌と同程度または少なかったが、溶出水中の有機物濃度は土壌より高値であった。

有機物を除去するための効果的な処理方法は、エネルギー使用量、二酸化炭素排出量、設備投資コスト等の視点から目開き1 mm の篩による乾式選別処理と考えられたが、処理をしても土壌と比較して水溶性の有機物が多く、再資源化にあたって課題があった。

キーワード：土壁材、乾式選別、湿式選別、焼成、全有機体炭素

はじめに

家屋解体工事に伴って発生する壁土や屋根土の多くは建設系廃棄物として処理されている。これら土壁材は土に藁、すき、糊などの有機物を含んでいることから、廃棄物の処理及び清掃に関する法律（昭和四十五年法律第百三十七号）で管理型産業廃棄物に分類される。建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律（平成十二年法律第百四号）の特定建設資材に該当しないため再資源化されにくく、処理費用が高額となることを背景に、

不適正な処理がなされる場合がある^{1, 2)}。この場合、土壁材が有機物源となって硫化水素が発生し周辺的生活環境に影響を及ぼす可能性は否定できない³⁾。土壁材に含まれる藁などの有機物は硫化水素発生の要因となりうる⁴⁾ことから、土壁材の再資源化に向けて藁などの有機物を効果的に除去する方法の開発が求められている。有機物除去方法が確立し土壁材を土木材料として再資源化が可能となれば、産業廃棄物処理業者の新規事業創出や土壁材の処理費用低下に伴う空き家解

* 三重県環境生活部環境共生局地球温暖化対策課

** 三重県鈴鹿地域防災総合事務所

体費用の低減など、経済的社会的な効果が生まれることが期待できる。本研究では、土壁材の再資源化を最終的な目標として、家屋解体工事現場で排出された土壁材に含まれる藁などの有機物の除去に向けた、効果的な処理方法を実験的に検討した。

土壁材中の有機物を除去する方法としては、物理的に土と藁・すさを分ける方法と藁などを燃焼させる方法が考えられる。具体的な中間処理施設として、回転式選別機、振動式選別機、風力選別機、比重選別機、炭化炉、焼成炉等が挙げられる。これらの産業廃棄物中間処理施設での処理を見据え、試験室スケールで実施可能である電動振動篩を用いた乾式選別処理、循環洗浄機能付き電動振動篩を用いた湿式選別処理、マッフル炉を用いた焼成処理の3方法を選択し、土壁材にそれぞれ施した。加えて、有機物除去処理後の土壁材中の全有機体炭素 (Total Organic Carbon 以下、TOC) 含有量、溶出量試験における溶出水中の TOC 濃度、生物化学的酸素要求量 (Biochemical Oxygen Demand 以下、BOD) 等を測定し、その変化量か

ら、各処理方法の有機物除去効果を評価した。

本研究で得られた結果から、土壁材を再資源化するための基礎的な知見が得られたので、以下に報告する。

方法

1. 土壁材

三重県内で解体された家屋から採取した土壁材5種類を対象とした。採取した土壁材は、築42年家屋の屋根瓦下の土(屋根材)、築30年家屋の和室の壁土(聚楽壁)、築51年家屋の和室の壁土(繊維壁)、同家屋の玄関の壁土(大津壁)、築53年家屋の洗面所の壁土(漆喰壁)で、外観を図1に示す。この試料は佐藤ら³⁾が評価対象とした土壁材と同一物であり、本研究では解体家屋から採取したままポリ袋で保管していた土壁材(以下、未調製試料)と、ワイレー型破碎機で粉碎後2mmの篩を通過させた後ポリ袋で保管していた土壁材(以下、調製試料)を用いた。

環境庁告示第46号(平成3年8月23日)による溶出量試験と環境省告示第19号(平成15年3

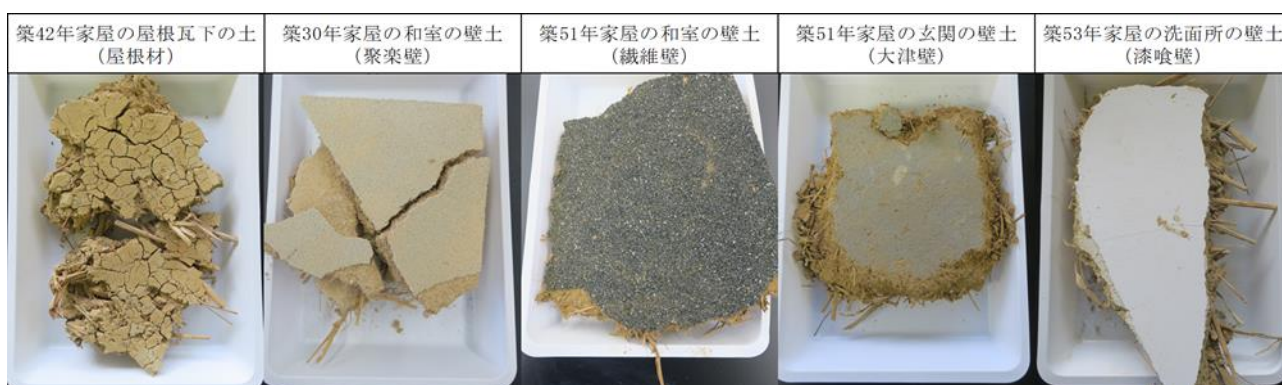


図1 土壁材の外観

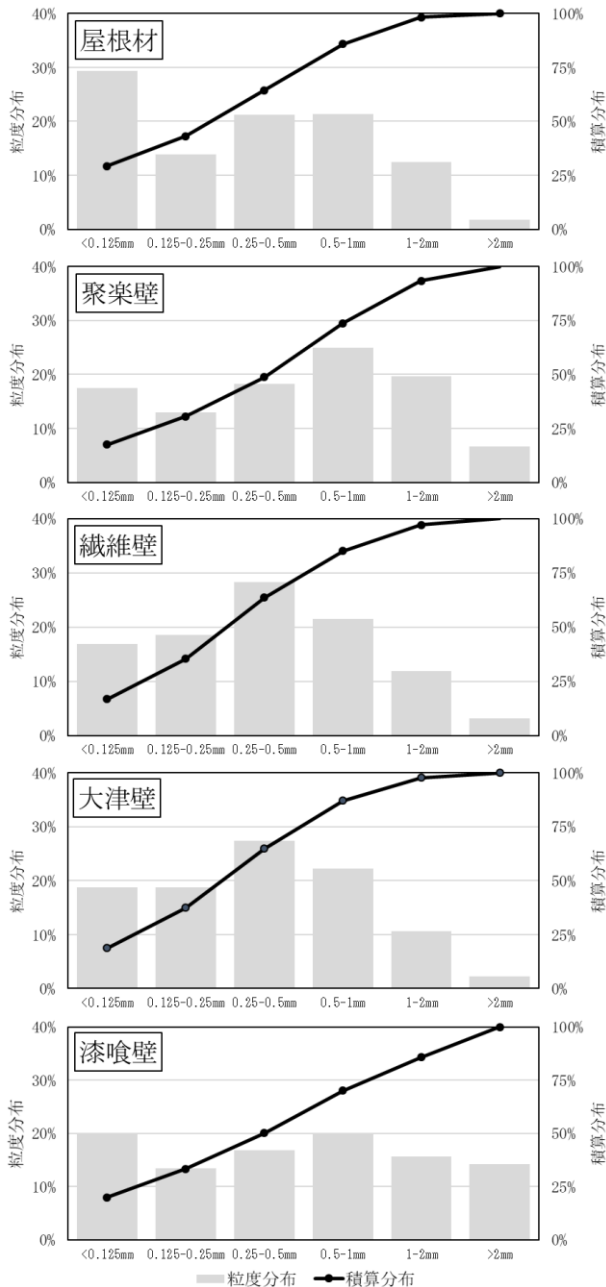
表1 粒径別試料中の藁等混入状況および混入した藁の短径

	粒径別試料					
	<0.125mm	0.125-0.25mm	0.25-0.5mm	0.5-1mm	1-2mm	>2mm
屋根材	-	-	0.18mm	0.5mm	0.8mm	1.5-2mm
聚楽壁	-	0.1mm	0.18mm	0.5mm	0.6mm	1.5-2mm
繊維壁	-	0.1-0.15mm	0.15mm	0.2-0.22mm 0.45-0.5mm	1.2mm	1.8mm
大津壁	-	0.1mm	0.2mm 0.15mm	0.5mm	1.2mm	1.8mm
漆喰壁	-	0.1mm	0.1mm	0.2mm	0.8-1mm	1.5-2mm 白色上塗り

- は藁等が確認されなかったことを示す

月 6 日) による含有量試験の結果により, 5 種の土壁材は土壌の汚染に係る環境基準および土壌含有量基準を満たしていることが確認された。

土壁材 5 種の粒度分布および積算分布は図 2 に示すとおりであり, 中央粒径(メディアン径, D50)は 0.15~0.25 mm の範囲に, 90%粒径 (D90) は 0.60~1.22 mm の範囲にあった。また, 粒径別試料



積算分布によるD50・D90

	屋根材	聚楽壁	繊維壁	大津壁	漆喰壁
D50	0.15	0.25	0.17	0.17	0.24
D90	0.63	0.88	0.66	0.60	1.22

単位: mm

図 2 土壁材の粒度分布・積算分布

中の藁等の混入状況と混入した藁の大きさ(短径)は表 1 に示すとおりであった。

2. 機械式電動振動篩を用いた乾式選別処理

機械式電動振動篩(オガワ精機製電磁式ふるい振とう機 OSK45DD-BA200)に篩(目開き 5.6 mm, 1 mm, 0.25 mm のいずれか 1 種)を設置して, 1 回につき試料 500 g または 100 g を 1.5 mm 幅, 1 分連続運転条件で篩分けた。

未調整試料を木づちで解砕した後, 5.6 mm 篩に通して篩上物は廃棄し, 5.6 mm 未満の試料を得た。次に, 5.6 mm 未満の試料を 1 mm 篩に通して 1 mm 未満の試料を得た。続いて, 1 mm 未満の試料を 0.25 mm 篩に通して 0.25 mm 未満の試料を得た。これらを 5 mm 篩下物, 1 mm 篩下物, 0.25 mm 篩下物として評価した。手順の詳細を図 3 に示す。

3. 機械式電動振動篩に循環洗浄機能を付した湿式選別処理

機械式電動振動篩に 1 mm と 0.125 mm の 2 種の篩を重ねて設置し, 調製試料 300 g を篩にのせた。幅 1.5 mm, 連続運転で試料を選別しながら, 篩の上部からシャワー状の水で試料を洗浄した。篩の下部から流れ出した水はビーカーに受け, ダイヤフラムポンプで水を毎秒 11 g で汲み上げて再度篩上部からの洗浄水として循環使用した。循環洗浄水は超純水 3 L を使用し, 30 分間連続して

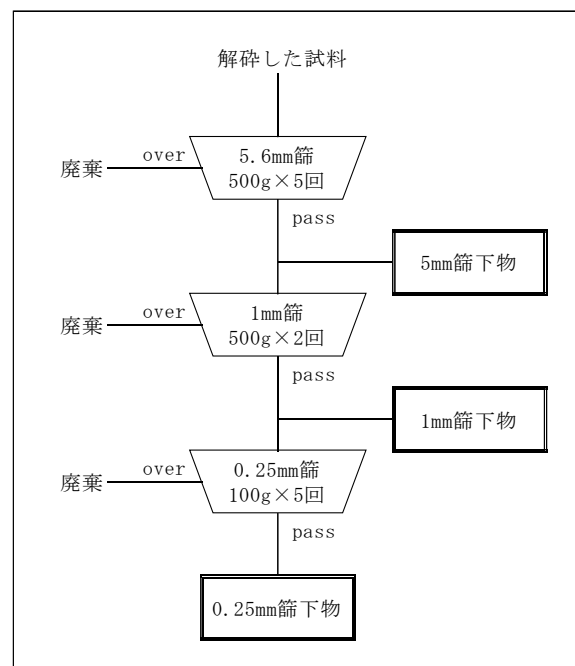


図 3 乾式選別処理のフロー

土壁材を循環洗浄した。洗浄中はビーカー内の循環洗浄水の電気伝導率（Electrical conductivity 以下、EC）を常時測定し、洗浄を開始して30分以内に安定状態となっていることを確認した。装置の模式図を図4に示す。

洗浄後、循環洗浄水3Lはビーカー内に溜めて静置し、上澄み液を遠心分離（3000G、15分）した後、孔径0.45 μmのメンブランフィルターで吸引ろ過をした。ろ液を洗浄水とし、溶出量試験に準じて水に溶出させた水とみなして評価に供した。

洗浄後、1mm篩上に残った残渣は廃棄し、0.125

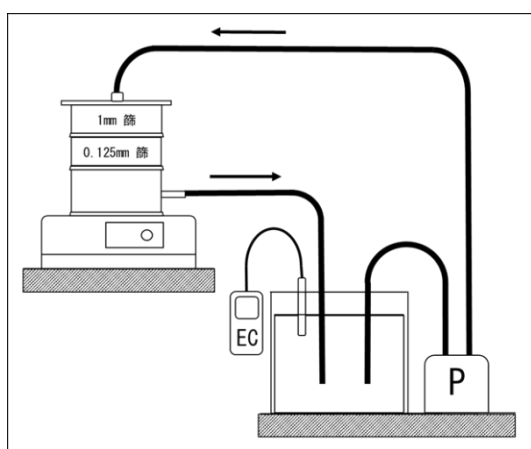


図4 湿式選別処理装置の模式図

表2 測定方法と測定機器

土壁材中の有機物量		
項目	測定方法	測定機器
熱しゃく減量	環整95号	-
TOC	底質調査法II 4.10	ジェイ・サイエンス・ラボ®製JM10
TN	底質調査法II 4.10	ジェイ・サイエンス・ラボ®製JM10
溶出水中の有機物等濃度		
項目	測定方法	測定機器
BOD	JIS K0102 21	HACH製HQ430d
COD	JIS K0102 17	-
TOC	JIS K0102 22.2	島津製作所製TOC-V CPH
pH	JIS K0102 12.1	堀場製作所製F-52
EC	JIS K0102 13	堀場製作所製DS-52
SO ₄ ²⁻	JIS K0102 41.3	サーモフィッジャーサイエンティフィック製ICS-6000
Cl ⁻	JIS K0102 35.3	サーモフィッジャーサイエンティフィック製ICS-6000
溶出水中の重金属類濃度		
項目	測定方法	測定機器
Cd	JIS K0102 55.4	Agilent 7800
Pb	JIS K0102 54.4	Agilent 7800
As	JIS K0102 61.4	Agilent 7800
Se	JIS K0102 67.4	Agilent 7800
Cr(VI)	JIS K0102 65.2.1	島津製作所 UV-1800
F	JIS K0102 34.1	島津製作所 UV-1800
B	JIS K0102 47.3	Agilent 5800

mm篩上に残った残渣と循環洗浄水静置後の沈殿物、遠心分離後に残った残渣を混合し、105°Cで乾燥させた。これをメノー乳鉢で粗砕した試料を水洗浄物として評価した。

4. マッフル炉を用いた焼成処理

調製試料約200gを磁性皿（底部外径140mm）に厚さ約15mmで入れ、マッフル炉で800°C⁵⁾、2時間焼成した。室温で放冷後、焼成物として評価した。

5. 比較対象の土壌

有機物除去処理後の比較対象として、三重県内の農用地で採取した土壌（淡色黒ボク土、細粒黄色土、礫質黄色土）および市販の黒ボク土（関東ローム層）の4種の土壌を用いた。

6. 有機物除去処理効果の評価方法

それぞれの有機物除去処理後に得られた処理物（以下、処理後物）中に含有する有機物量は、TOC含有量その他、熱しゃく減量、全窒素（Total Nitrogen 以下、TN）含有量を測定することによって確認した。

また、処理後物中の有機物が水へ溶出する量を確認するため、環境庁告示第46号に定める溶出量試験により得られた溶出水中のTOC、BOD、化学的酸素要求量（Chemical oxygen demand 以下、COD）、pH、EC、硫酸イオン濃度、塩化物イオン濃度を測定した。測定方法と測定機器を表2に示す。処理後物のうち焼成物のみ溶出水中の重金属類（Cd、Pb、As、Se、Cr(VI)、F、B）の濃度を測定した。

有機物除去処理を施していない調製試料（以下、未処理物）と比較対象である土壌も処理後物と同様に測定した。

結果および考察

1. 土壁材中に含有する有機物量

土壁材の熱しゃく減量、TOC含有量、TN含有量の測定結果を表3に、土壁材の種類ごとの熱しゃく減量とTOC含有量の結果を図5に示す。

1.1 熱しゃく減量

焼成物の熱しゃく減量はすべて0.1%未満であり、焼成処理において800°Cで加熱したため有機物が存在していないことが確認された。

表3 土壁材中の有機物含有量および溶出量試験における溶出水の有機物濃度等

		熱しゃく減量 (%)	TOC含有量 (mg/g)	TN含有量 (mg/g)	TOC (mg/L)	BOD (mg/L)	COD (mg/L)	pH	EC (mS/m)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)
5mm篩下物	屋根材	4.6	3.2	0.3	31	43	27	6.2	19	35	6
	聚楽壁	2.7	2.6	0.2	19	22	21	8.8	18	20	3
	繊維壁	5.2	7.1	0.8	30	29	35	5.5	11	19	8
	大津壁	5.4	7.8	0.6	21	23	27	7.4	28	47	11
	漆喰壁	3.5	2.7	0.3	21	24	23	8.8	19	12	4
1mm篩下物	屋根材	4.7	2.2	0.3	28	48	24	6.2	20	37	6
	聚楽壁	3.1	1.6	0.2	22	32	22	8.8	20	24	4
	繊維壁	4.7	5.8	0.7	29	32	32	5.5	11	19	8
	大津壁	5.0	5.6	0.6	20	29	25	7.5	26	46	10
	漆喰壁	3.1	2.0	0.2	18	29	24	8.5	19	13	4
0.25mm篩下物	屋根材	5.2	1.7	0.3	30	42	23	6.1	23	47	7
	聚楽壁	4.5	1.7	0.2	31	35	31	8.6	27	37	7
	繊維壁	5.8	6.5	0.7	35	29	37	5.4	12	19	10
	大津壁	6.2	6.4	0.6	25	23	29	7.5	34	62	13
	漆喰壁	4.0	2.0	0.2	24	19	27	8.4	22	20	6
水洗浄物	屋根材	4.8	3.7	0.3	23	36	27	6.0	10	21	<1
	聚楽壁	2.8	2.5	0.2	17	22	21	8.9	11	7	<1
	繊維壁	4.8	7.5	0.8	45	55	57	5.1	10	17	1
	大津壁	5.6	8.3	0.5	37	39	48	8.2	20	23	1
	漆喰壁	3.4	3.7	0.2	22	28	28	8.9	13	4	1
洗浄水	屋根材	-	-	-	27	40	23	6.1	20	41	7
	聚楽壁	-	-	-	17	22	17	8.8	15	16	3
	繊維壁	-	-	-	25	20	29	5.6	9.8	14	8
	大津壁	-	-	-	25	24	29	8.1	33	76	10
	漆喰壁	-	-	-	18	20	20	8.8	15	11	4
焼成物	屋根材	<0.1	<0.1	<0.02	<0.1	0.6	<0.5	5.5	15	57	<1
	聚楽壁	<0.1	<0.1	<0.02	<0.1	0.5	<0.5	10.7	21	19	<1
	繊維壁	<0.1	<0.1	<0.02	<0.1	0.6	<0.5	7.4	17	61	<1
	大津壁	<0.1	<0.1	<0.02	<0.1	0.5	<0.5	11.6	90	42	2
	漆喰壁	<0.1	<0.1	<0.02	0.2	<0.5	<0.5	12.4	460	1	2
未処理物	屋根材	4.9	2.9	0.3	32	61	30	6.1	24	52	6
	聚楽壁	2.8	2.2	0.2	20	31	22	8.8	18	20	3
	繊維壁	5.6	8.9	0.8	33	34	39	5.6	12	20	8
	大津壁	7.1	11.5	0.7	37	43	46	8.0	39	84	10
	漆喰壁	6.9	3.9	0.3	24	36	30	8.9	19	13	5
土壌	淡色黒ボク土	8.2	23.0	1.9	6.3	3.3	16	6.3	3.5	3	<1
	細粒黄色土	5.2	10.0	1.2	11	5.8	17	6.0	4.7	3	<1
	礫質黄色土	4.9	4.9	1.2	5.1	7.4	11	6.7	1.4	2	<1
	黒ボク土	12.5	29.3	2.7	2.9	2.6	5.4	6.1	10	23	1

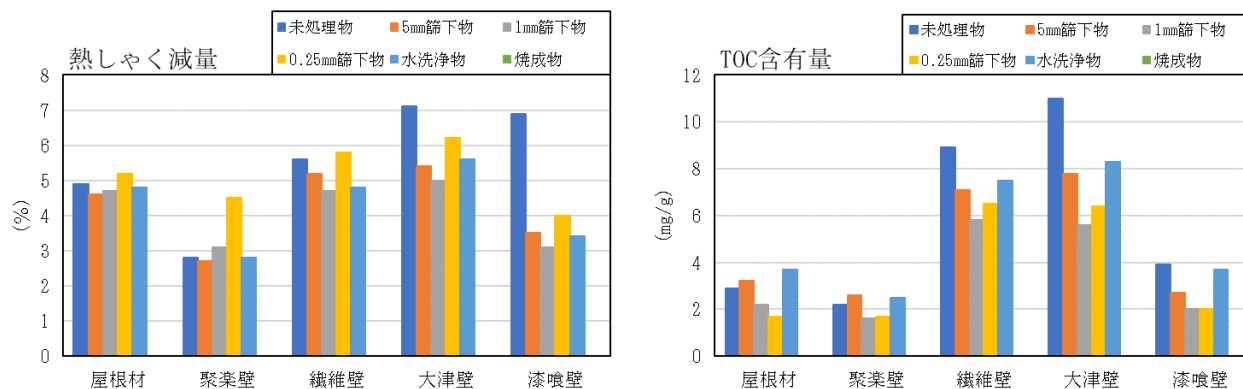


図5 土壁材の種類ごとの熱しゃく減量と TOC 含有量

漆喰壁の熱しゃく減量は、未処理物と比較して（図 5）、5 mm 篩下物は 49%減少、1 mm 篩下物は 55%減少、0.25 mm 篩下物は 42%減少、水洗浄物は 50%減少したが、聚楽壁の熱しゃく減量は、5 mm 篩下物は 7%減少、1 mm 篩下物は 10%増加、0.25 mm 篩下物は 60%増加、水洗浄物は変化しなかった。このように、乾式選別処理または湿式選別処理を施した土壁材の熱しゃく減量は、未処理物と比較して、処理前後に一貫した変化が確認されなかった。また、土壌の熱しゃく減量と比較すると、同程度か低値であった。

1.2 TOC 含有量, TN 含有量

焼成物の TOC 含有量, TN 含有量の結果からも、焼成物中に有機物が存在しないかごくわずかであることが確認された。

焼成物以外の処理後物の TOC 含有量について、未処理物と比較したところ（図 5）、1 mm 篩下物の TOC 含有量は 24~51%減少、0.25 mm 篩下物の TOC 含有量は 22~48%減少した。5 mm 篩下物と水洗浄物の TOC 含有量は屋根材と聚楽壁で増加したが、繊維壁、大津壁、漆喰壁は減少した。このことから、乾式選別処理では 1 mm 篩または 0.25 mm 篩で選別した土壁材の TOC 含有量が減少すること、湿式選別処理では TOC 含有量が土壁材の種類によっては増加することが確認された。

一方で、処理後物と土壌の TOC 含有量を比較したところ、肥沃な黒ボク土、淡色黒ボク土より TOC 含有量が低く、細粒黄色土、礫質黄色土と同程度であった。未処理物についても、黒ボク土、淡色黒ボク土より TOC 含有量が低い結果であった。土壁材の TOC 含有量は、有機物除去処理を施さずとも土壌の TOC 含有量と同程度または低い値であることが確認された。

TN 含有量について、未処理物と処理後物ともに低い値であり、有機物除去処理による変化は確認されなかった。土壌の TN 含有量と比較しても、すべて低い値であった。

得られた結果から、目開きが 1 mm または 0.25 mm の篩による乾式選別処理と焼成処理が土壁材中の有機物の除去に効果的な処理方法であることが判明した。

2. 溶出水中の有機物濃度

処理後物、未処理物、土壌の溶出量試験におけ

る溶出水および洗浄水の TOC, BOD, COD の測定結果を表 3 に示す。また、土壁材の種類ごとの TOC, BOD の結果を図 6 に示す。

TOC に着目すると、未処理物と比較して（図 6）、5 mm 篩下物の TOC は 3~43%減少した。1 mm 篩下物では聚楽壁の TOC が 10%増加し、0.25 mm 篩下物では聚楽壁と繊維壁の TOC が 6~55%増加したものの、その他の種類は 6~45%減少した。水洗浄物では繊維壁の TOC は 36%増加したが、その他の種類は 0~28%減少した。

乾式選別処理では、BOD, COD においても同様に処理前後の変化の傾向はみられず、藁ではなく糊の成分による影響が大きいと考えられた。

湿式選別処理では、洗浄水の TOC は 17~27 mg/L であり、水洗浄物の TOC 17~46 mg/L と同程度であった。このことから、湿式選別処理による TOC 低減は大きく期待できず、洗浄水の BOD 値が土壌より高いため一般環境へ排出するには排水処理が必要となる場合がある。したがって、湿式選別処理は有機物除去効果が見込めず、環境への負荷が高く効果的に処理できる方法ではないと考えられた。

焼成処理では、焼成物の TOC は低く、BOD および COD についても検出下限値未満付近の低濃度であり、焼成物中に有機物がほとんど存在しないことがこの結果からも確認された。

土壌の TOC と処理後物の TOC を比較すると、焼成物以外は高濃度を示したため、土壁材には水溶性の有機物量が多く含有することが伺えた。

3. 溶出水中の pH, EC, 硫酸イオン濃度, 塩化物イオン濃度

処理後物、未処理物、土壌の溶出量試験の溶出水および洗浄水の測定結果を表 3 に、土壁材の種類ごとの硫酸イオン濃度、塩化物イオン濃度の結果を図 6 に示す。

pH について、乾式選別処理後物の pH は 5.4~8.8、未処理物の pH は 5.6~8.9 の範囲にあり、処理による変化は確認されなかった。土壌の溶出水の pH 6.0~6.7 と比較すると、土壁材の pH の範囲が大きかった。焼成物のうち屋根材の pH は未処理物と比較してやや酸性、繊維壁は中性、その他 3 種の土壁材はアルカリ性となった。一般的に漆喰壁の上塗りには消石灰 (Ca(OH)₂) が用いられ、今回検討に用いた漆喰壁は解体家屋から採取したことから空気中の二酸化炭素と十分に反応し

て炭酸カルシウム (CaCO₃) に変化していた⁶⁾ と考えられる。このため未処理物の pH は中性付近を示したが、焼成処理によって漆喰壁に含まれる炭酸カルシウムが生石灰 (CaO) となったため、その溶出水はアルカリ性を示したと推察された。他 4 種の土壁材についても、焼成処理による材料成分の変化によって pH が変化したものと考えられるが、同じ種類の土壁材であっても材料や配合割合は一樣でない⁷⁾ ことから知見を得るには多くのサンプルを評価する必要がある。

EC について、未処理物の土壁材の EC は 12～39 mS/m の範囲にあり、湿式選別により水洗浄物の EC は 16～58%低下した。水洗浄物に比べて洗浄水の EC が高いことから、水に土壁材の水溶性成分が溶け出したためと考えられる。また、焼成物のうち屋根材のみ EC が低下したが、他 4 種の土壁材では増加し、特に大津壁と漆喰壁は大幅に増加した。これは pH と同じく焼成処理によるものと推察された。土壌と比較すると、未処理物であっても EC は土壌より高値であり、土壌と比較して水溶性成分が多いことが確認された。

硫酸イオン濃度について、焼成物は土壁材の種類による差が大きく、未処理物と比較して (図 6)、屋根材は 9%増加、繊維壁は 205%増加、聚楽壁は

5%減少、大津壁は 50%減少、漆喰壁は 92%減少した。これは含有している硫酸塩の存在形態と焼成による酸化など要因が複数あると考えられた。

また、乾式選別の 5 mm 篩下物は硫酸イオン濃度が 0～44%減少し、1 mm 篩下物については聚楽壁のみ 20%増加し、その他の 4 種は 5～45%減少した。0.25 mm 篩下物の聚楽壁は 85%、漆喰壁は 53%増加し、その他の 3 種は 5～26%減少した。土壁材の種類によって差があるが、目開きが小さくなるほど水へ溶出する硫酸塩が多い結果となった。

水洗浄物の硫酸イオン濃度は、未処理物と比較して 15～72%低下していることから、水による洗浄効果は認められた、洗浄水の硫酸イオン濃度は未処理物と同程度であった。

土壌の硫酸イオン濃度は 2～23mg/L と土壌の種類で差があるが、処理後物と同程度もしくは処理後物が高い結果となった。

塩化物イオン濃度について、水洗浄物は低濃度であり、洗浄水からは塩化物イオンが検出されていることから、循環洗浄によって土壁材が洗浄され、塩類が水相に移行したと考える。乾式選別処理では、5 mm 篩下物および 1 mm 篩下物は未処理物と比較して -33～20%の増減であったが、0.25

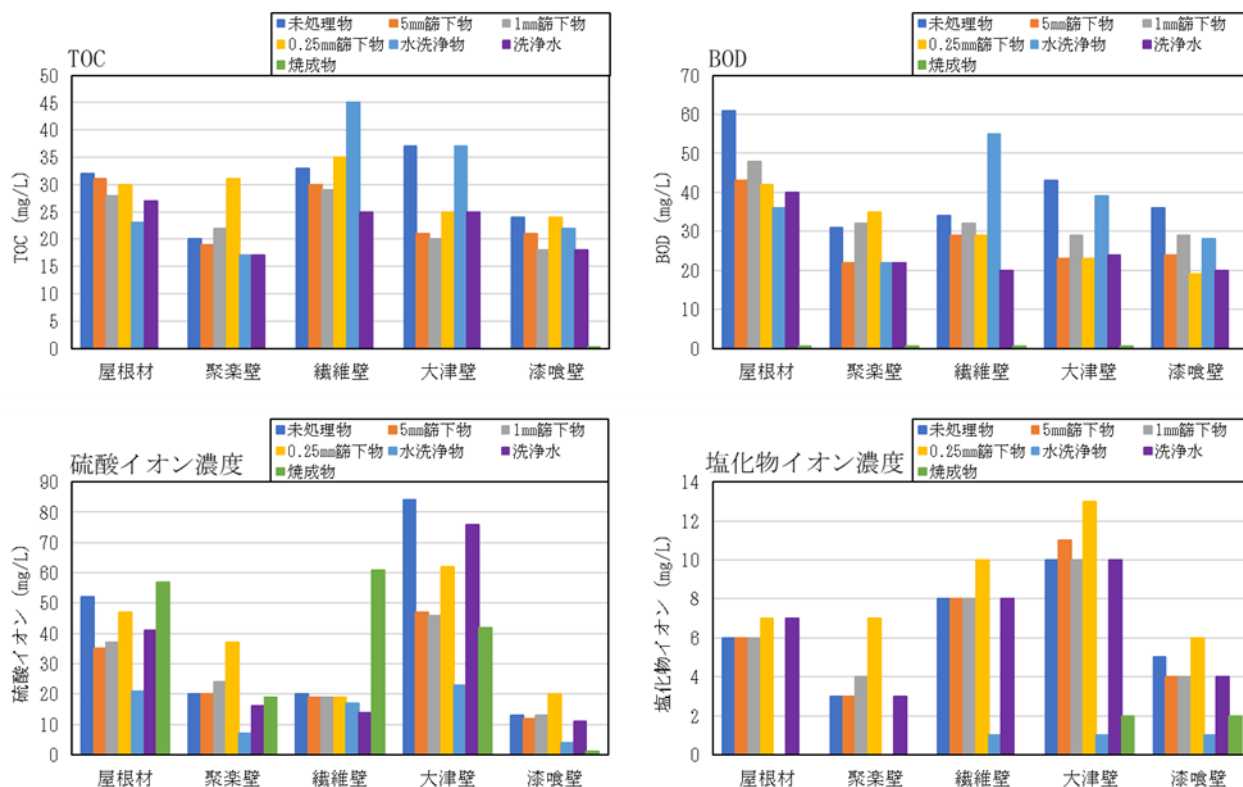


図 6 土壁材の種類ごとの TOC, BOD, 硫酸イオン濃度, 塩化物イオン濃度

mm 篩下物は 20~133%増加することから、硫酸イオンと同様に目開きが小さくなるほど水へ溶出する塩類が多い結果となった。

4. 焼成物の溶出水中の重金属類濃度

焼成物の溶出量試験の重金属類 (Cd, Pb, As, Se, Cr(VI), F, B) 濃度の結果を表 4 に示す。朱色に着色した数値は土壌の汚染に係る環境基準を超過した結果を表す。

焼成物は有機物がほぼ存在しないが、Cr(VI)や As, Se, F が高濃度で溶出することが確認された。Cr(VI)は基準値の最大 7.4 倍、As は基準値の最大 5.5 倍、Se は基準値の最大 2.7 倍、F は基準値の最大 1.8 倍であった。未処理物の溶出水では未検出あるいは低濃度であることから、焼成によって土壁材に含有する Cr が酸化するなど重金属類の存在形態が変化すると考えられた。

焼成処理によって土壁材中の有機物をほぼ完全に除去できるが、土壌の汚染に係る環境基準を超える重金属類が検出されることや、焼成するためのエネルギーコストなど課題は多い。今回の試験では焼成温度は 800°C に設定したが、藁が燃焼する低温度帯で焼成することで Cr(VI)の生成や含有成分の形態変化を抑制できる可能性があり、焼成温度を検討する余地はある。

5. 有機物除去の効果

測定結果のうち、土壁材中の TOC 含有量、溶出量試験における溶出水の TOC, BOD, COD について、土壁材の種類ごとに除去率を下式により計算した結果の平均値を表 5 に示す。

$$\text{除去率 (\%)} = \frac{(\text{未処理物の結果} - \text{処理後物の結果})}{\text{未処理物の結果}} \times 100$$

乾式選別処理は、除去率が比較的高かった方法であり、1 mm の篩で処理する方法が効果的であった。

湿式選別処理は、洗浄水に有機物が移行するものの、水洗浄物の TOC 含有量、TOC, COD の除去率は低く、有機物除去としては他の処理より劣る結果となった。処理に伴って排出される洗浄水を環境中へ放流する場合には排水処理が必要になる場合がある。

焼成処理は TOC 含有量、TOC, BOD, COD の除去率がほぼ 100%であり、有機物の除去に最も

表 4 焼成物の溶出水中重金属類濃度の結果

	焼成物				
	屋根材	聚楽壁	繊維壁	大津壁	漆喰壁
Cd	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003
Pb	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
As	0.006	0.055	0.007	0.012	<0.005
Se	0.003	0.005	0.015	0.027	0.002
Cr(VI)	0.06	0.37	0.09	0.27	0.07
F	<0.1	0.9	0.1	1.3	1.5
B	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1

(単位: mg/L)

表 5 有機物の除去率

		TOC含有量	TOC	BOD	COD
		乾式選別処理	5mm篩下物	10	15
	1mm篩下物	37	17	15	21
	0.25mm篩下物	36	-4	25	7
湿式選別処理	水洗浄物	1	3	8	-6
焼成処理	焼成物	100	100	99	100

(単位: %)

効果がある処理方法であるが、今回処理した 800°C では重金属類が高濃度で溶出することが課題である。

有機物除去効率や二酸化炭素の排出量、エネルギーコスト、処理施設の建設コスト等を考慮すると、検討した 3 方法の有機物除去処理では、1 mm 篩による乾式選別処理が環境負荷の少ない処理方法と考えられるが、その処理後物は土壌よりも水溶性の有機物を多く含んでいた。乾式選別処理後に、さらに何らかの工夫をすることで再資源化の可能性があると考えられる。

結 語

土壁材の再資源化を最終的な目標として、解体工事現場で排出された土壁材に含有する藁などの有機物を除去するために、効果的な処理方法を実験的に検討した。

乾式選別処理と湿式選別処理、焼成処理の 3 方法の処理を選択し、5 種の土壁材にそれぞれ施した。土壁材中の有機物量 (TOC 含有量と TN 含有量、熱しゃく減量)、溶出量試験における溶出水の有機物濃度 (TOC, BOD, COD) と硫酸イオン濃度、塩化物イオン濃度等を測定し、その変化量を調査した。土壌に対しても同様に測定して比較した。

乾式選別処理では、土壁材中の有機物除去には

1 mm または 0.25 mm の篩による選別処理が効果的であった。一方、溶出水中の有機物濃度は処理をしても大きな濃度変化はみられず、目開きが最も小さい 0.25 mm 篩では溶出水中の有機物濃度が増加する結果であったことから、藁ではなく糊の成分による影響が大きいと考えられた。また、目開きが小さくなるほど水へ溶出する硫酸塩、塩類が多い結果となった。

湿式選別処理では、洗浄水中のイオン成分濃度から土壁材の洗浄効果は確認されたが、処理後の土壁材の有機物含有量の変化はわずかであった。処理に伴って排出された洗浄水の有機物濃度は比較的高濃度であった。

焼成処理は有機物除去に最も効果的な処理方法であるが、上塗りとして使われている材料が焼成によって変化した影響により、処理後の土壁材の溶出量試験において Cr(VI)や As 等の有害物質が土壌の汚染に係る環境基準を超過した。今回は 800℃で焼成処理を施したが、Cr(VI)等の有害物質が溶出しないような焼成温度を検討する余地はある。

土壌と乾式・湿式選別処理後の土壁材を比較したところ、土壁材に含有する有機物量は処理前であっても土壌と同程度もしくは少なかった。溶出水中の有機物濃度は土壌よりも高濃度であり、土壁材には水溶性の有機物が多く存在していることが伺えた。

今回の検討の範囲においては、有機物を除去するための効果的な処理方法は、エネルギー使用、二酸化炭素排出量、設備投資コスト等の観点から目開き 1 mm の篩による乾式選別処理と考えられた。しかし、処理をしても水溶性の有機物は除去できないことから、さらに何らかの工夫をすることで再資源化の可能性があると考えられた。加えて、今回は基礎的な検討であり、処理の条件・方法を変えた場合、本研究で使用した同じ種類の土壁材であっても新たに採取した土壁材を用いた

場合、実機で処理した場合には今回の結果と異なることも想定される。土壁材の再資源化に向けて、今後も検討が必要である。

謝 辞

本研究は、令和 4 年度公益財団法人岡三加藤文化振興財団研究助成を受けて実施しました。

土壁材の採取にあたって協力をいただいた事業者の皆様には謝意を表します。

本研究について助言をいただいた三重県環境生活部環境共生局廃棄物監視・指導課の佐藤邦彦様をはじめ廃棄物監視・指導課、廃棄物対策課、資源循環推進課の皆様には謝意を表します。

文 献

- 1) 環境省、産業廃棄物の不法投棄等の状況（令和 3 年度）について、<https://www.env.go.jp/content/000101966.pdf>（2025 年 1 月 17 日アクセス）
- 2) 環境省、産業廃棄物の不法投棄等の状況（令和 5 年度）について、<https://www.env.go.jp/content/000265002.pdf>（2025 年 1 月 22 日アクセス）
- 3) 佐藤邦彦，渡邊卓弥，近藤笑加，立野雄也，奥山幸俊，肴倉宏史：土壁材の再生利用に係る環境安全性についての基礎的調査研究，第 32 回廃棄物資源循環学会研究発表会講演集，177-178（2021）。
- 4) 小野雄策：廃石膏ボード類埋立における硫化水素ガスの発生とその防止対策，安全工学，**49**（4），212-219（2010）。
- 5) 岩尾俊男，林圭腕，竹山光一：木質系ペレットの燃焼特性に関する研究，島根大農研報，**24**，140-145（1990）。
- 6) 一重喬一郎，鳥越文乃，服部順昭：建築用漆喰のインベントリ分析，第3回日本LCA学会研究発表会要旨集，276-277（2008）。
- 7) 宮野則彦，宮野秋彦：和壁の熱伝導特性に関する考察，熱物性，**21**（4），193-199（2007）。